Pilze als Zerstörer – eine Bedrohung für Kunst- und Kulturgut

Katja Sterflinger*

Abstract: Fungi play a major role for the deterioration of cultural heritage in museums, collections, libraries and on monuments. Due to their enormous enzymatic activity and their ability to grow at low a_w values fungi are able to inhabit and to decay paintings, textiles, paper, parchment, leather, oil, casein, glue and other materials used for historical art objects. The weathering of stone monuments is significantly increased by epi- and endolitic fungi. In museums and their storage rooms, climate control, regular cleaning and microbiological monitoring are essential in order to prevent fungal contamination.

Zusammenfassung: Schimmelpilze spielen eine Hauptrolle als Besiedler und Zersetzer von Kunst- und Kulturgut in Museen, in Sammlungen und in Bibliotheken und an Baudenkmälern. Schimmelpilze können bereits bei niedrigen a_w Werten wachsen. Sie haben eine enorme enzymatische Aktivität und sind daher in der Lage zahlreiche Substrate und Materialien nicht nur zu besiedeln sondern auch abzubauen: Gemälde, Textilien, Papier, Pergament, Leder, Öl, Kasein, organische Leime und andere Materialien, die für die Herstellung historischer Kunstwerke und deren Konservierung verwendet wurden. Gesteinsbesiedelnde - epi- und endolithische - Pilze tragen entscheidend zur Verwitterung von Objekten aus Naturstein bei. Zur wirksamen Vorbeugung gegen Pilzbefall in Museen und deren Depots bedarf es natürlich einer geeigneten Klimaregelung aber vor allem auch einer regelmäßigen Reinigung und Überwachung. Sind Objekte bereits befallen, braucht es spezifisch auf sie zugeschnittene Methoden um sie zu erhalten und zu behandeln.

Key words: Schimmelpilze, Holz zerstörende Pilze, Kunstwerke, biogener Zerfall, enzymatischer Abbau, Klimakontrolle.

*Correspondence to: katja.sterflinger@boku.ac.at

Address: Department für Biotechnologie, Universität für Bodenkultur, Muthgasse 11, 1180 Wien, Austria.

EINLEITUNG

Pilze haben – wie in den anderen Kapiteln dieses Kataloges ausführlich beschrieben – zahlreiche positive Eigenschaften: sie remineralisieren organische Substanzen und spielen daher als Bodenorganismen eine wichtige Rolle im Kreislauf der Natur, sie bilden Symbiosen mit zahlreichen Baumarten und versorgen diese mit zusätzlichen Nährstoffen, sie dienen dem Menschen als Nahrung und sind Quelle für Arzneimittel. Die Fruchtkörper vieler Großpilze sind hübsch anzusehen und selbst die so genannten Schimmelpilze – also die mikroskopisch kleinen Vertreter des Pilzreiches – sind außerordentlich ästhetisch, wenn man sie im Mikroskop betrachtet.

Gerade aber Schimmelpilze werden dann zu einem Problem für den Menschen, wenn sie in unseren Gebäuden, im Wohnraum und am Arbeitsplatz auftreten, wo sie auf Baumaterialien unter geeigneten Bedingungen – also ausreichender Feuchtigkeit – auskeimen und gedeihen können. Neben den negativen Auswirkungen auf die menschliche

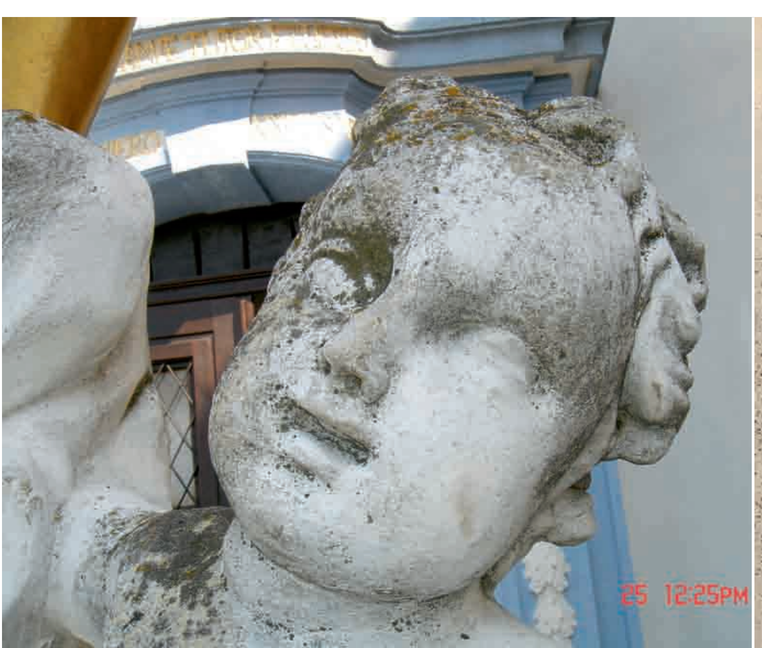


Abb. 1: Kopf einer geschlämmten Natursteinfigur (Dürnstein, Wachau) mit Besiedlung durch Flechten, Cyanobakterien und schwarze Pilze (Foto: Sterflinger).



Abb. 2: Pilzbewuchs (*Cladosporium* sp.) in einem Kircheninnenraum verursacht durch organische Bestandteile im Wandanstrich (Foto: Sterflinger).



Abb. 3: Schwarze, mikrokoloniale Pilze verursachen Läsionen in einer antiken Marmorsäule (Ephesos, Türkei; Foto: Sterflinger).

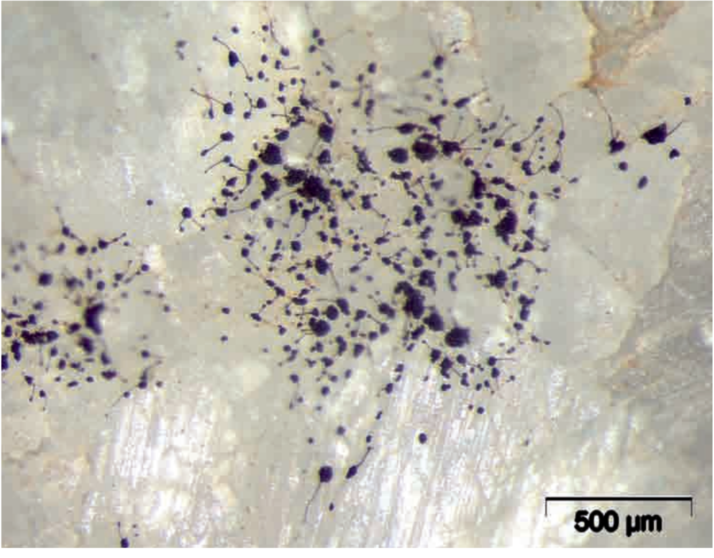


Abb. 4: Mikrokolonien schwarzer Pilze mit Satellitenkolonien auf antiker Marmoroberfläche (Foto: Sterflinger).

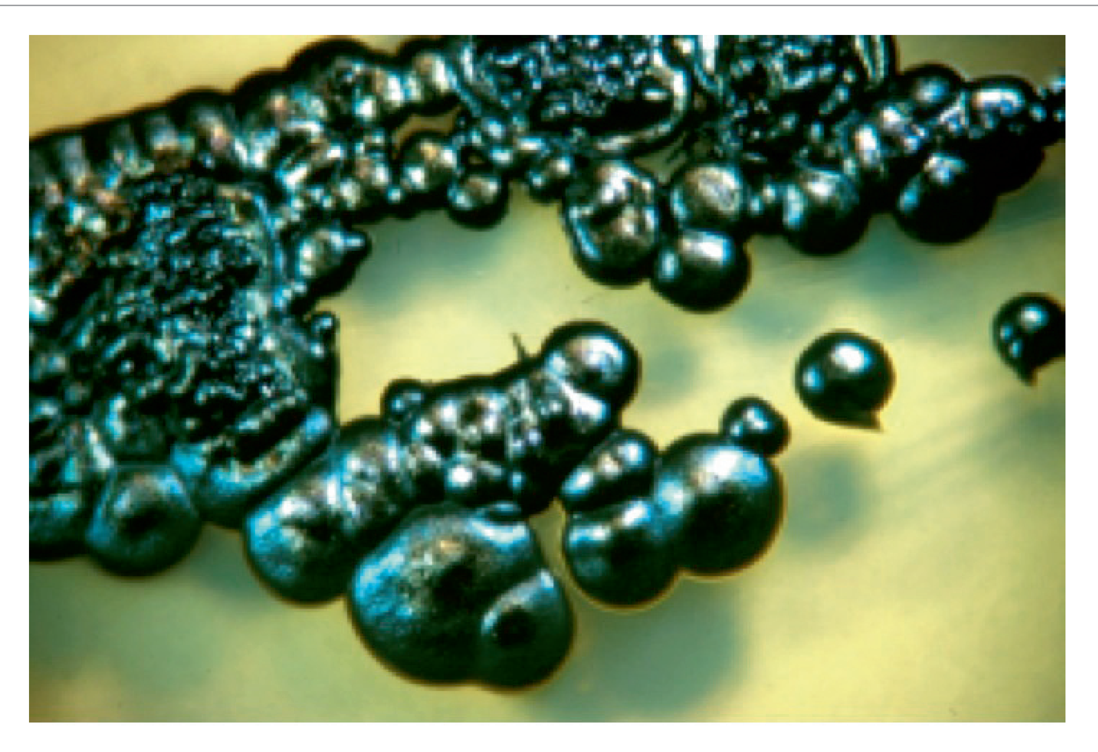


Abb. 5: Schwarze Hefen sind typische Besiedler von Gesteinsoberflächen: hier *Exophiala jeanselmei* auf einer Agarplatte (Foto: Sterflinger).

Gesundheit – Pilzsporen sind allergen und manche Pilzarten können auch systemische Krankheiten beim Menschen auslösen - beeinträchtigen Pilze die von ihnen besiedelten Materialien in erheblichem Maße:

- Pilzwachstum auf Bauteilen und Materialien führt durch die starke Pigmentbildung der Pilze oft zu erheblichen optischen Beeinträchtigungen.
- Pilze scheiden zahlreiche organische Säuren aus – z.B. Oxalsäure und Zitronensäure – aus und dies führt zur Korrosion von Materialien.
- Pilze können zahlreiche organische Substanzen abbauen und damit erheblichen Materialverlust an Holz, Papier, Textilien, Leder und organischen Bestandteilen in Malereien verursachen.
- Pilze bilden ausgedehnte 3-dimensionale Netze in Materialien und sind trotz ihrer optischen Zartheit in der Lage Materialien durch mechanische Wirkung zu verändern und zu zerstören.

Pilze als Besiedler von Monumenten, Skulpturen und historischer Architekturoberflächen

Aus mikrobiologischer Sicht sind Gesteins- Putz- und andere Bauteiloberflächen äußerst extreme Standorte: sie sind arm an Nährstoffen, die Wasserverfügbarkeit schwankt zwischen Schlagregen und völliger Austrocknung, mechanische Erosion erschwert den Organismen die Anheftung an das Substrat und die mit der Sonnenexposition einhergehende UV-Strahlung kann die DNA schädigen. Nichtsdestotrotz werden Oberflächen von Gebäuden und Skulpturen in allen Gebieten der Erde von Pilzen, Flechten und Bakterien besiedelt (STERFLINGER 2005, SELBMANN et al. 2005). Epilithische Pilze – die auf der Gesteinsoberfläche leben – und endolithische Pilze – die in Poren, Rissen und selbstgeschaffenen Hohlräumen des Gesteins leben – sind ein bedeutender Faktor für die Verwitterung von Denkmälern aus Natur- und Kunststein (Guss, Zement, Beton) sowie Putz, Fassungen und Schlämmen (Abb. 1-4). Pilze sind aus materialökologischer Sicht wahrscheinlich sogar die wichtigsten Organismen auf Baustein und Putz, weil ihre physiologische Aktivität und ihr Wachstum extrem korrosiv und erodierend ist (STERFLINGER 2000, SCHEERER et al. 2009, GADD 2007). Auf Denkmälern gibt es zwei große morphologische und ökologische Gruppen von Pilzen, die an verschiedene Umweltbedingungen angepasst sind: In gemäßigten oder feuchten Klimata werden die Pilzgemeinschaften dominiert von Hyphomyzeten, einschließlich Arten der Gattungen *Alternaria*, *Cladosporium*, *Epicoccum*, *Aureobasidium* und *Phoma*. In trokkenen und halbtrockenen Gebieten, wie z.B. dem Mittelmeerraum, verlagert sich die Pilzgemeinschaft hin zu schwarzen Hefen und mikrokolonialen Pilzen. Schwarze Pilze gehören zu den Gattungen *Hortaea*, *Sarcinomyces*, *Coniosporium*, *Capnobotryella*, *Exophialia* und *Trimmatostroma* (Abb. 5). Diese bilden knotige, schwarze

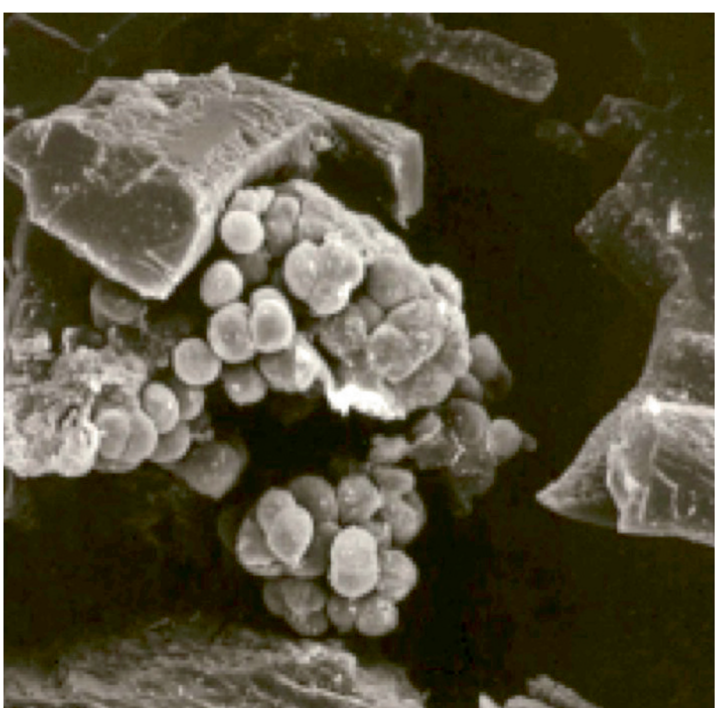
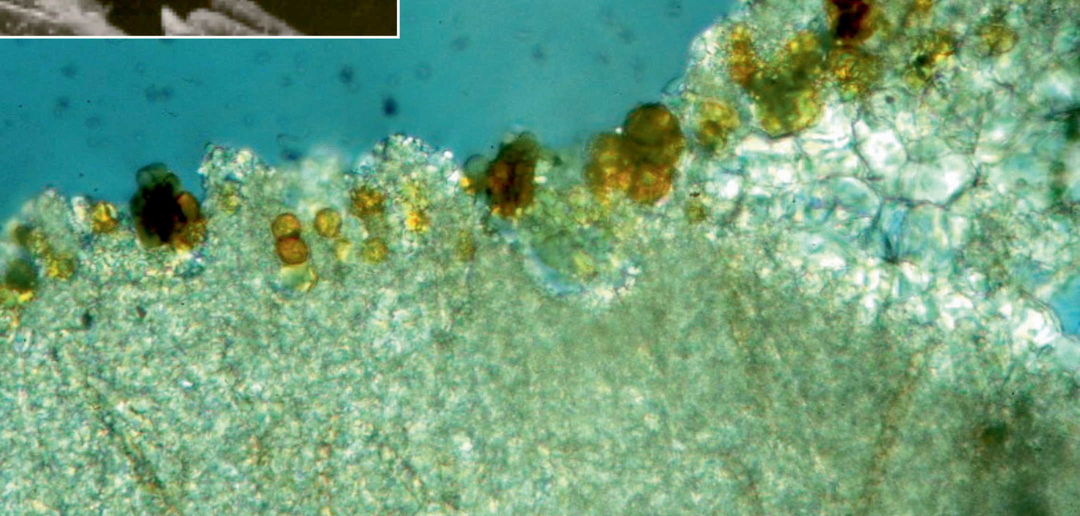


Abb. 6: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Kolonie eines schwarzen, mikokolonialen Pilzes auf Marmor (Foto: Sterflinger).

Abb. 7: Petrographischer Dünnschliff eines Kalksteins mit deutlich in Läsionen eingesenkten Kolonien von gesteinsbesiedelnden Pilzen (Foto: Sterflinger).



Kolonien auf und im Stein (Abb. 6, 7) und kommen oft in enger Gemeinschaft mit Flechten vor (Sterflinger 2005). Berühmte Denkmäler, die von diesen Pilzen bewachsen sind und geschädigt werden, sind die Akropolis in Athen, die Marmordenkmäler auf der Krim und die antiken Tempel von Delos oder der Hadrianstempel in Ephesos (Diakumaku et al. 1995, Sterflinger 2000). Aufgrund ihrer mehrschichtigen Zellwände, die mit dem dunklen Pigment Melanin inkrustiert sind, widerstehen die Pilze chemischen und physikalischen Angriffen und können durch Biozide und andere anti-mikrobielle Behandlungen nur schwer abgetötet werden.

Schwarze Pilze dringen tief in Granit, Kalk und Marmor ein und sorgen durch ihre enorme Sprengkraft und biochemische Vorgänge, die derzeit noch nicht vollständig aufgeklärt sind, für die Zerstörung des Gesteins. Biogener Lochfraß (engl. biopitting) – die Ausbildung von Läsionen von bis zu 2 cm Durchmesser und Tiefe im Stein – ist ein spektakuläres Zerstörungsphänomen, dass in erster Linie auf antiken Marmoren im Mittelmeerraum vorkommt. Biopitting wird durch schwarze Pilze verursacht. Bedingt durch die starke Melanineinlagerung in den Zellwänden der Pilze, sehen Gesteinsoberflächen, die von diesen Pilzen besiedelt werden, fleckig aus, oder sind sogar vollständig von schwarzen Schichten bedeckt. Schwarze Pilze werden nicht nur im Freiland gefunden, sondern auch auf Steinoberflächen von Höhlen und Katakomben (Saarela et al. 2004). Die ältesten und wertvollsten Objekte, die derzeit unter schwerem Befall mit schwarzen Pilzen leiden, sind die Höhlenmalereien von Lascaux (Bastian & Alabouvette 2009).

Die mikroskopisch kleinen Pilze, die Gesteine besiedeln und zerstören, sind hinsichtlich ihrer Ernährungsgrundlagen äußerst anspruchslos und an die nähr-



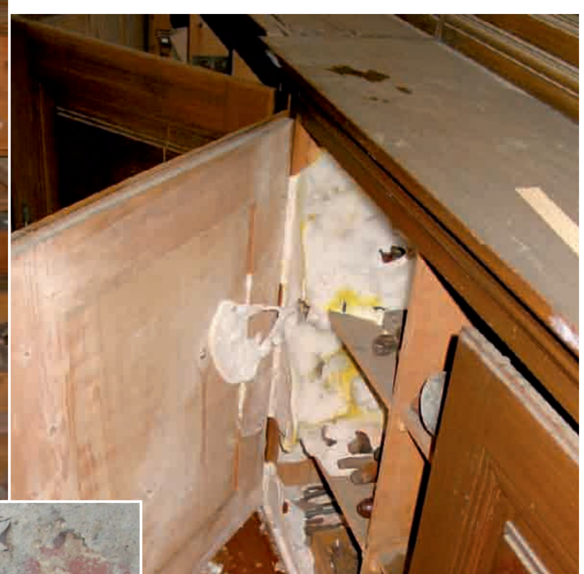


Abb. 8, 9: Zerstörung des Holzbodens, der Vitrinen und der Ausstellungsstücke in einer historischen Drechslerei durch den Echten Hausschwamm (Foto: Sterflinger).



Abb. 10: Fruchtkörper des Echten Hausschwammes auf einer Mauerwerkoberfläche in historischem Gewölbekeller (Foto: Sterflinger).

stoffarmen Bedingungen am Stein gut angepasst: sie verwerten eine Vielzahl von aus der Luft stammenden Kohlenstoffquellen wie Aromate, Kohlenwasserstoffe, in Staub und Schmutz vorhandene organische Partikel, und viele sind sogar fähig die aus der Verbrennung von Benzin und Dieseltreibstoff stammenden Polyzyklischen Aromate (PAHs) abzubauen. Aus diesem Grund sind die Oberflächen von Objekten in den Innenstädten stärker und oft von einer größeren Vielfalt von Pilzen besiedelt als dies in ländlichen Reinluftgegenden der Fall ist. Dort überwiegen auf den Skulpturen und an Fassaden die Flechten, die wiederum aufgrund ihrer Sensibilität gegenüber Luftverschmutzung in der Stadt weniger ausgeprägt sind.

Schimmelpilze in Museen, Sammlungen, und Bibliotheken

Häufig tritt Schimmelpilzbefall an Kunstgegenständen auf, wenn schlechte Lagerungsbedingungen in Schauräumen und Depots zu erhöhter Feuchtigkeit in der Raumluft oder an den Gegenständen selber führen.

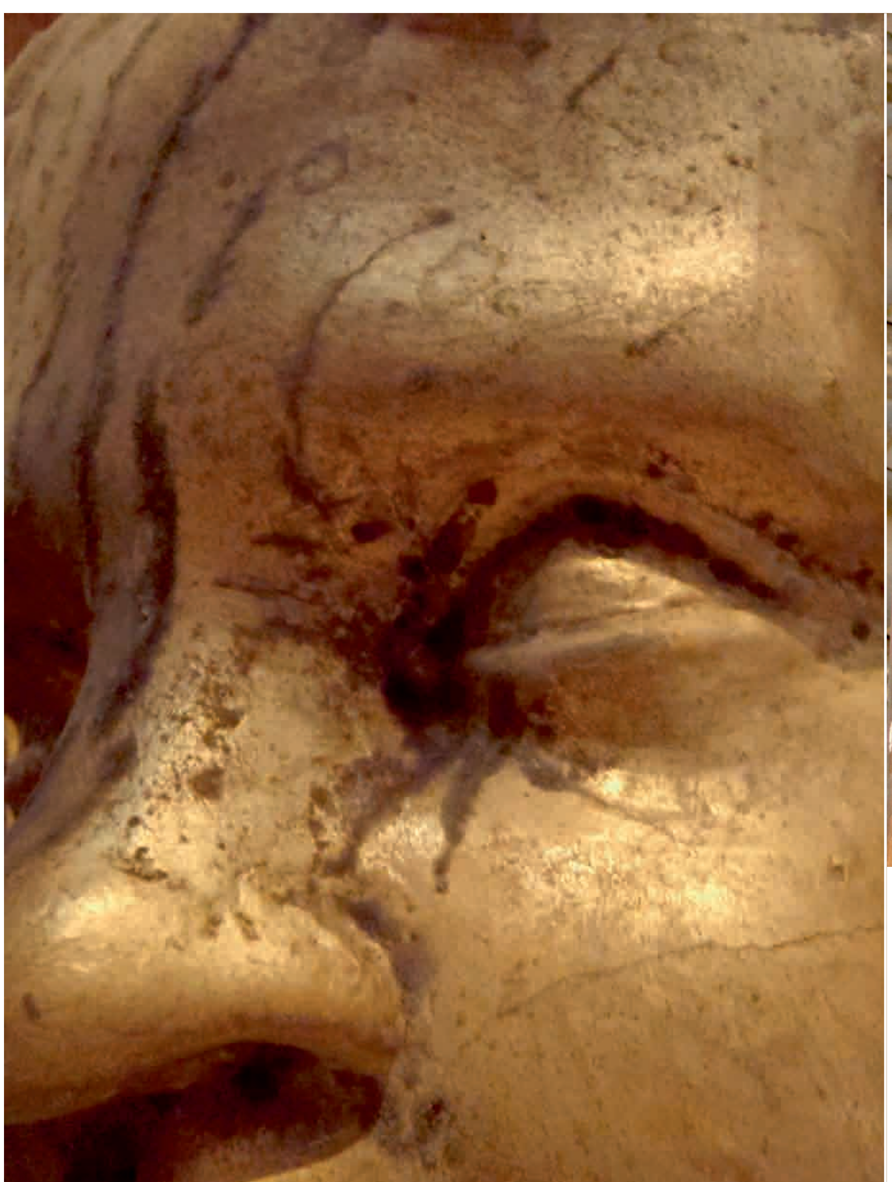




Abb. 12: Schimmelpilzbefall auf vergoldetem Stuckrahmen im Rahmendepot eines Museums (Foto: Sterflinger).

Abb. 11: Pilzwachstum (dunkle Bereiche, *Cladosporium* sp.) auf vergoldeter Figur eines spätbarocken Hochaltares (Foto: Sterflinger).

Schimmelpilzschäden gibt es in alten, nicht klimatisierten Museen ebenso wie in neu errichteten Museen mit technologisch hochwertiger Klimatisierung (ALLSOPP et al. 2004, NITTÉRUS 2000a, CAPITELLI et al. 2009, MANOHARACHARY et al. 1997, MESQUITA et al. 2009, PANGALLO et al. 2007, KOESTLER et al. 2003).

Dass Pilze in der Lage sind alle möglichen Arten von organischem und anorganischem Material zu besiedeln, zu verändern und abzubauen ist gut bekannt; welche enorme Zerstörungskraft Pilze auf Objekte ausüben können und wie schnell sich Schimmelpilze unter geeigneten Bedingungen über ganze Depotbestände ausbreiten können, ist für viele Restauratoren und Museumskuratoren immer wieder ein unangenehme Überraschung (Abb. 8-20). Ein wesentlicher Grund für die erheblichen biogenen Schäden an Kunstgegenständen ist, dass diese aus organischen Materialien hergestellt wurden und daher die für die Pilze gut abbaubar sind. Auch heute werden authentische, und damit meist organische, Materialien für die Restaurierung und den Erhalt der Objekte verwendet: Farbe wurde und wird aus mineralischen Pigmenten hergestellt, die mit organischen Bindemitteln wie Eidotter, Kasein, Leinsamen-, Mohn- oder Hanföl, Chinaholzöl, oder verschiedenen Harzen zu einer cremigen Konsistenz vermischt werden (Abb. 13, Abb. 17, 19, 20). Als Malschichtträger diente eine auf einen Holzrahmen gespannte Leinwand, die oft vor dem Malen mit Hasenleim oder Stärke grundiert wurde. Kostbare Holz- oder Stuckrahmen sowie Figuren wurden unter Verwendung von organischen Klebstoffen, Leinsamen- oder Terpentinöl vergoldet (Abb. 11, 12). Die Basis für Kleb-

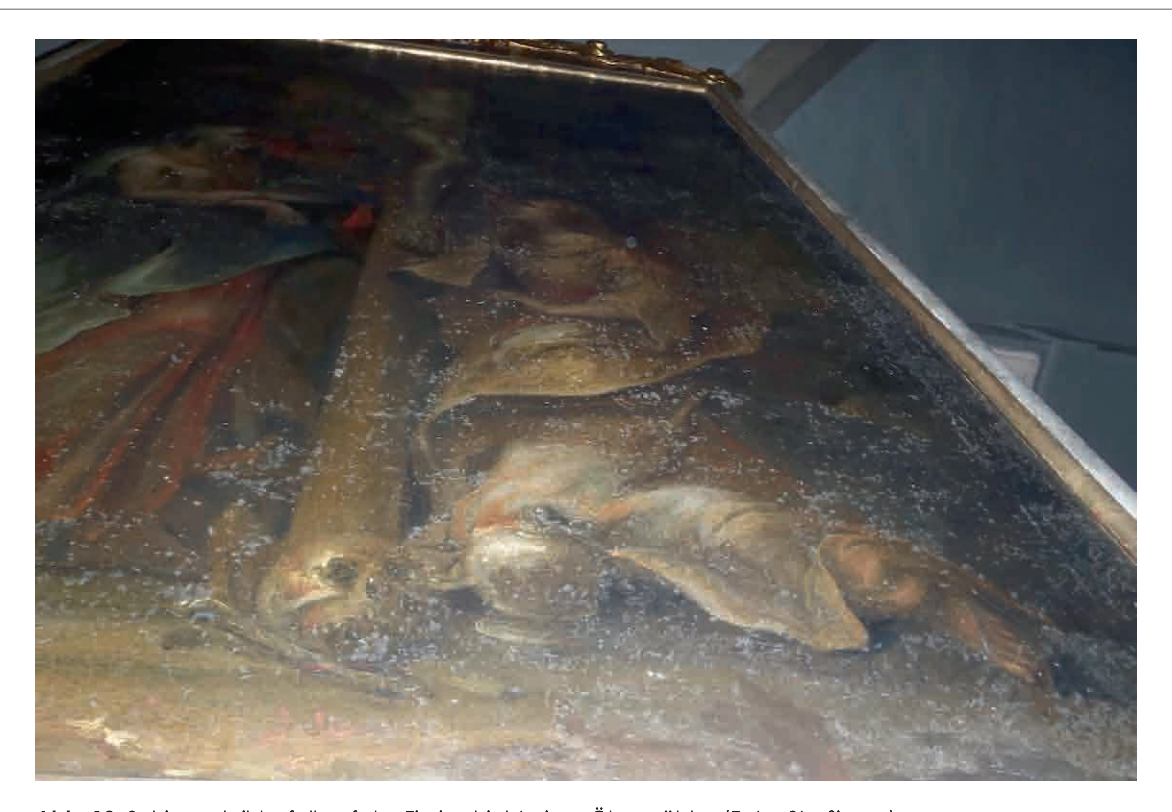


Abb. 13: Schimmelpilzbefall auf der Firnisschicht eines Ölgemäldes (Foto: Sterflinger).

stoffe war Zellulose, Hasenleim oder Fischleim. Textilien, Leder, Stroh, Lehm, Naturhaar und Federn wurden zur Dekoration von Statuen und andere Kunstgegenständen verwendet. Bücher und Schriftrollen mit unschätzbarem Wert wurden aus Papier, Papyrus und Pergament hergestellt (Abb. 15). Pilze bauen diese organischen Verbindungen ab, indem sie Enzyme – Zellulasen, Glutanasen, Laccasen, Phenolasen, Keratinasen, Monooxygenasen und viele andere – aus der Zelle transportiere. Dort werden hochmolekularen Verbindungen von diesen Exoenzymen in kleinere Moleküle zerlegt und diese werden von Pilzen als Nahrung aufgenommen. Da manche Pilze bereits bei einer Wasserverfügbarkeit von a_w 0.65 auskeimen und wachsen können, bedarf es bei der Lagerung von Museumsgegenständen einer besonderen Kontrolle der mikroklimatischen Nischen in unmittelbarer Umgebung der Objekte oder sogar am Material selber.

An vielen Kunstobjekten stellt Pilzbefall aufgrund oftmals intensiven Pigmentierung der Kolonien zunächst eine – wenn auch schwerwiegende - ästhetische Beeinträchtigung dar (Sterflinger et al. 1999). Mit der Besiedlung einhergehend kommt es in vielen Fällen jedoch auch zum Materialabbau und zum damit zum Materialverlust. Der enzymatische Abbau von organischen Bindemitteln reduziert die Farbschichten, das Pigment verliert die Haftung zum Untergrund. Pilze dringen mit ihren Hyphen (Zellfäden) durch Risse in Malschichten ein und bilden unter der Fassung neue Myzelien und Kolonien. Dies kann zu einer mechanischen Absprengung loser Malschichtschollen führen oder eine Schollenbildung erst verursachen.

Für die Erhaltung von Bibliotheksbeständen sind Pilze ein besonderes Problem: Insbesondere in Depots gibt es auf und in Schriftstücken und Büchern oft zahlreiche, aus der Luft stammende Schimmelpilzsporen. Kommt es zu einer Erhöhung der Feuchtigkeit aufgrund eines Wasserschadens, einer defekten Klimaanlage oder aufgrund geänderter Heiz- und Lüftungsgewohnheiten, können Bestände innerhalb weniger tage von Schimmelpilzrasen überzogen sein. Für Papier und Papyrus sind Schimmelpilze deshalb besonders zerstörerisch, weil es durch die Ausscheidung von Zellulasen, zu der zahlreiche Pilzarten befähigt sind, rasch zur Schädigung der Papierfasern kommt (Sterflinger & Pinzari 2012). So sind an geschädigtem Papier – aber auch Holz oder Karton – fast immer Arten der Gattungen *Chaetomium* – erkennbar an den schwarzen, kugelförmigen und mit Setae versehenen Fruchtkörper - oder *Trichoderma* – erkennbar an den gelblich bis grünen und granulären Kolonien - anzutreffen. Arten dieser Gattungen sind gute Zelluloseverwerter bauen Papier rasch ab.

Auch manche Großpilze haben die Eigenschaft Zellulose sehr



Abb. 14: Schimmelpilzbefall auf einem historischen Möbelstück im Depot eines Museums (Foto: Sterflinger).

Abb. 15: Schimmelpilzbefall an Archivbüchern wenige Tage nach einem Wasserschaden (Foto: Sterflinger).



Abb. 16: Schimmelpilzbefall an historischem Möbelstück. Der Befall ist insbesondere in den organischen Leim, der für die Intarsien verwendet wurde, eingedrungen (Foto: Sterflinger).

rasch und effektiv abzubauen: *Serpula lacrymans* – der „Echte Hausschwamm“ - oder *Coniophora puteana* – auch als „Kellerschwamm“ oder „brauner Warzenschwamm“ bekannt – sind eine Gefahr für historische Holzkonstruktionen. In Kirchen, an Altären, an historischen Dachstühlen, Fachwerkhäusern oder Zwischendecken aus Holz können diese Pilze beträchtliche Schäden anrichten (Bech-Andersen & Elborne 2004). Der Abbau des Holzes kann bis zum völligen Verlust der Tragfähigkeit gehen und damit statische Probleme in Gebäuden verursachen. Die Behandlung eines Hausschwammbefalles erfolgt nach der Ö-Norm B 3802-2. Da diese Ö-Norm die Entfernung des befallenen Holzes (+ 1,5 m über den sichtbar befallenen Bereich) vorschreibt, ist sie auf histori-



Abb. 17: Ausschnitt aus einer Wandmalerei in einer Kirche mit punktuellem Pilzbefall (Zillis, Schweiz) (Foto: Sterflinger).

sche Objekte nur bedingt anwendbar. Oft müssen daher objektspezifische Lösungen gefunden werden, mit denen der Hausschwamm zwar nicht völlig entfernt aber abgetötet oder zum Wachstumsstillstand gebracht werden kann. In machen Fällen ist eine thermische Behandlung erfolgreich (Aufheizen von Holz oder Bauteilen unter kontrollierten Bedingungen), in anderen Fällen kann durch Trockenlegung, Klimakontrolle und Biozidbehandlung (Bohrlochtränkung) benachbarter Wandbereiche ein Zustand erzeugt werden, in dem der Pilz nicht aktiv ist und sich nicht weiter ausbreiten kann. Ein innenraumrelevanter Pilz, der die zum Abbau des Lignin befähigt sind – und daher die so genannte „Weißfäule" verursacht – ist der „Ausgebreitete Hausporling" (*Donkioporia expansa*).

In Tabelle 1 sind Pilzgattungen und Arten aufgelistet, die häufig auf Papier, Pergament und anderen Materialien in Museen sowie an Naturstein auftreten. Die überwiegende Anzahl der Pilze, die für den biologischen Abbau von Kulturgut eine Rolle spielen, gehören zu den Euascomycetes; Hemiascomycetes – Hefen – wurden selten auf Kunstgegenständen gefunden, ebenso Teleomorphe; die einzigen häufigen teleomorphen Gattungen sind *Chaetomium* – meist auf Papier, Holz und Federn – und *Eurotium*, in Umgebungen mit niedrigen a_w-Werten. Das Auftreten von Basidiomyzeten beschränkt sich auf den Abbau von Holz in Kirchen oder anderen geschützten historischen Denkmälern. Einzig die Basidiomyzetenhefe *Sporobolomyces yunnanensis* tritt regelmäßig zusammen mit schwarzen Pilzen an Gesteinen auf. Zygomyceten („Jochpilze") wie *Mucor* oder *Rhizopus* werden von Kunstgegenständen zwar regelmäßig isoliert, aber sie dürften in den meisten Fällen dort nur als Transienten mit einzelnen im Staub abgelagerten Sporen auftreten, und an den Objekten nicht etabliert sein.

In Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit beschränkt sich der Artenreichtum von Pilzen im Museum oder den Lagerräumen auf einige wenige xerophile (Trockenheit lieben-

Tabelle 1 – Die häufigsten in Museen und auf Kunstgegenständen vorkommenden Pilze

Daten aus: Sterflinger/ACBR (unveröffentlichte Daten), Mesquita et al. (2009), Meier & Petersen (2006), Blyskal (2009), Pangallo et al. (2009), Sterflinger & Prillinger (2001), Huckfeld & Schmidt (2005), Marvasi et al. (2012).

Substrat	**Gattung/Art**
Malerei: Öl, Wasserfarben, Acryl	*Alternaria* sp. *Aspergillus flavus, Aspergillus sect. Niger, A. sydowii, A. versicolor* *Aureobasidium pullulans* *Chaetomium funicola* *Cladosporium herbarum, C. cladosporioides* *Eurotium chevalieri, E. rubrum* *Fusarium* sp. *Mucor* sp. *Penicillium chrysogenum, P. citrinum,* *P. decumbens* und viele andere Arten der Gattung
Papier (Büttenpapier, holzfreies Papier) und Textilien aus Zellulose (Baumwolle, Leinen)	*Alternaria* sp. *Aspergillus clavatus, A. flavus, A. glaucus, A. terreus, A. repens,* *A. ruber, A. fumigatus, A. ochraceus, A. nidulans,* *Aspergillus sect. Niger* *Botrytis cinerea* *Chaetomium globosum, C. elatum, C. indicum* *Eurotium amstelodami* *Fusarium* sp. *Mucor* sp. *Paecilomyces variotii* *Penicillium chrysogenum, P. funinculosum, P. pupurogenum,* *P. rubrum, P. variabile, P. spinulosum, P. fellutatum, P. frequetans, P. citrinum* *Pichia guilliermondi* *Rhizopus oryzae* *Stachybotrys chartarum* *Toxicocladosporium irritans* *Trichoderma harzianum, T. viride* *Stemphilium* sp. *Ulocladium* sp.
Pergament	*Cladosporium cladosporioides* *Epicoccum nigrum* *Phlebiopsis gigantea* *Penicillium chrysogenum* *Thanatephorus cucumeris*
Keratinöse Substanzen (Leder, Wolle, Federn, Fell, Haare)	*Absidia glauca, A. cylindrospora, A. spinosa* *Acremonium* sp. *Alternaria alternata* *Aspergillus sydowii, A. candidus, A. clavatus, A. carneus, A. foetidus,* *A. flavus, A. fumigatus,* und viele andere Arten der Gattung *Arthroderma* sp. *Aureobasidium pullulans* *Chaetomium globosum* *Chrysosporium* sp. *Coniosporium* sp. *Cladosporium cladosporioides* *Cunninghamella echinulata, C. elegans* *Epicoccum nigrum* *Emericella* sp. *Geotrichum candidum* *Mucor* sp. *Penicillium brevicompactum, P. chrysogenum* und viele andere Arten der Gattung *Phoma medicaginis* *Scopulaiopsis* sp. *Stachybotrys chartarum* *Trichophyton* sp. *Rhizopus* sp.
Archäologische Funde	Archäologische Fundstücke sind oft reich beladen mit Sporen; deren Knochen, Keramik Vielfalt hängt von der Vielfalt an Pilzen in der Erde des Fundorts ab.
Holz	*Antrodia* (*Poria*) *vaillantii* (Weißer Porenschwamm) *Aureobasidium pullulans* *Ceratocystis* spp. *Chaetomium* spp. *Coniophora puteana* (Brauner Kellerschwamm) *Coprinus* spp. (Tintlinge) *Donkioporia expansa* (Ausgebreiteter Hausporling)

	Gleophyllum spp. (Blättlinge) *Ophiostoma* spp. *Peziza* spp. (Becherlinge) *Serpula lacrymans* (Echter Hausschwamm) *Trichoderma* spp.
Naturstein, Putz (Außenbereich)	*Alternaria* sp. *Aureobasidium pullulans* *Capnobotryella* spp. *Cladosporium* spp. *Coniosporium* spp. *Coniothyrium* spp. *Cryptococcus* sp. *Epicoccum nigrum* *Exophiala jeanselmei* *Mycocalicium victoriae* *Phaeococcomyces* spp. *Phoma* spp. *Sarcinomyces petricola* *Sporobolomyces yunnanensis* *Taeniolella* sp. *Ulocladium* sp.



Abb. 18: Holzstößel aus archäologischen Funden mit Kolonien von Schimmelpilzen (Foto: Sterflinger).

de) oder xerotolerante (Trockenheit tolerierende) Arten wie *Eurotium* sp., *Aspergillus* sp. oder *Wallemia* sp.. So wachsen manche Arten der Gattung *Eurotium* bereits bei eine Wasseraktivität von > a_w 0,6. Dies ist auch der Grund dafür, dass sich an manchen Objekten und in machen Sammlung beinahe Reinkulturen einer Pilzart ausbreiten, deren ökologische Nische exakt den dort herrschenden Bedingungen entspricht. So war die zum Weltkulturerbe gehörende Holztafeldecke der St. Martin Kirche in Zillis – bis zur Reinigung und Konservierung - ausgedehnt von *Eurotium herbariorum* und dessen Nebenfruchtform *Aspergillus glaucus* besiedelt. Da die meisten anderen Schimmelpilze höhere Wasseraktivitäten für ihre Keimung und ihr Wachstum benötigen, kommt es nur dann zur Entwicklung einer großen Diversität von Pilzen, wenn die Feuchtigkeit für einen Zeitraum von einigen Wochen oder sogar Monaten auf mehr als 80% erhöht ist. Dies kann zum Beispiel durch einen nicht bemerkten Defekt der Klimaanlage, einen Wasserschaden oder durch falsches Lüftungsverhalten während eines feucht-warmen Sommers verursacht werden. Daher ist die Installation von Datenloggern, die Messdaten an ein Alarmsystem übermitteln, ein wesentlicher Bestandteil der modernen Museumsplanung, bei weitem jedoch



Abb. 19, 20: Bemalte Holztafeldecke (12. Jhd.) mit Befall durch *Eurotium* sp. und *Aspergillus* sp. (Zillis, Schweiz) (Foto: Sterflinger).

ist ein solches System noch nicht in allen Museum, die wertvolle Gegenstände lagern, etabliert.

Die Mikroflora von Pilzen in Museen ist auch davon beeinflusst, wie hoch der Eintrag von Kohlenstoff, Mineralien und anderen Luftinhaltsstoffen ist. Gysels et al. (2004) zeigten in einer Studie dass die Aerosole des Innenraums im Königlichen Museums der Bildenden Künste Antwerpen großteils von der Außenatmosphäre und den externen Quellen von organischen und anorganischen Verschmutzungen bestimmt werden. Viele Pilze sind durchaus in der Lage verschiedene Arten von organischen Verschmutzungen abzubauen, darunter auch polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (engl. PAHs). Aus diesem Grund ist auch die Diversität von Pilzen auf Denkmälern im urbanen Raum wesentlich höher als im ländlichen Raum der gleichen Klimazone (Sterflinger & Prillinger 2001).

Vorbeugung und Behandlung von Schimmelpilzschäden an Objekten

Die drei Schlüssel zur Verhinderung von Schimmelpilzkontaminationen in Museen sind: (1) Klimaregelung, (2) Reinigung und (3) regelmäßige Überwachung des Klimas, der Raumhygiene (Luftkeime, Keime und Staubablagerungen) und des Zustandes der Objekte.

Zu (1): Klimakonzepte müssen der spezifischen Architektur des Museums angepasst werden und es bedarf einer genau abgestimmten Planung der Klimaregelung. Die Temperatur im Zusammenhang mit der relativen und absoluten Feuchtigkeit sind entscheidende Parameter für die Auskeimung der Pilzsporen und das Wachstum eines Myzels. Dabei gilt grundsätzlich, dass die Pilze für die Keimung der Sporen mehr Feuchtigkeit benötigen als für das anschließende Wachstum des Myzels. Obwohl der Wert von 55% relativer Feuchtigkeit (rF) in den meisten Museen als Kardinalwert gilt und die in den Räumen durchgeführte Klimatisierung auf die Einhaltung dieses Wertes als maximale Obergrenze abzielt, kommt es dennoch regelmäßig zum Befall von Bauteilen oder Objekten in Museen. Warum ist das

so? Alle Museen auf der Welt messen Temperatur und Feuchtigkeit in Lager- und Schauräumen mit modernen Datenloggern, Datenschreibern oder einfachen Hygro- und Thermometern. Jedoch ist die Art und Weise der Klimamessungen oft unzureichend um das wirkliche Klima wiederzugeben und verschiedene Klimazonen im Gebäude zu entdecken. In seinem Buch über das Mikroklima in Museen zeigt Camuffo (1998) die Komplexität der Klimaüberwachung, für die ein in der Mitte des Museumsraums angebrachter Datenlogger deutlich unzureichend ist. Der Luftzug durch geöffnete Türen, die Erwärmung durch Sonnenlicht und die täglichen Änderungen des Temperaturgradienten, sowie die Isolation und Exposition der Gebäudehülle sind ebenso zu berücksichtigen. Pilze wachsen meist zwischen Regalen mit wenig Belüftung oder nahe an Wänden mit Temperaturen unter dem Kondensationspunkt. Mikronischen entstehen auch oft durch die Verpackung von einzelnen Objekten in Plastik oder extrem engen Schachteln, die einen Austausch von Luft und Feuchtigkeit nicht zulassen. Insbesondere in Kompaktregalen, die zwar eine Platz sparende Lösung für die Lagerung von Objekten darstellen, entsteht aufgrund des völligen Fehlens einer Belüftung oft ein Pilz-förderndes Mikroklima. Dabei spielt auch die Eigenschaft einiger Materialien Wasser aufzunehmen und dieses nur Verzögert wieder abzugeben eine Rolle: so kann Pilzwachstum in einem hygroskopischen Material (z.B. Holz, Papier) auch dann noch stattfinden, wenn das Klima im Raum nach einer kurzfristigen Erhöhung der rF bereits wieder normalisiert ist.

Zu (2) Trotz gewissenhafter Klimatisierung und -überwachung kann es in alten aber auch in neuen Museumsgebäuden zu unerwarteten Wasserschäden kommen. In diesem Fall ist die hygienische Situation – nämlich die Menge der auf den Objekten und im Staub abgelagerten Pilzsporen – letztlich entscheidend für das Ausmaß der mit einem Wasserschaden einhergehenden Pilzkontamination. Objekte, die stark mit Pilzsporen belastet sind, werden bei ausreichender Feuchtigkeit innerhalb von wenigen Tagen ausgedehnte Schimmelpilzrasen entwickeln. Auf ein sauberes Objekt mit geringer Sporenbelastung hingegen wird sich der Schaden viel geringer auswirken. Der Luftzug und Luftaustausch in den Räumen, der von der Ventilation herrührt, die Besucheranzahl, die Häufigkeit des Öffnens und Schließens von Türen, die einen eigenen Luftzug hervorruft, alle haben einen Einfluss auf Sporeneintrag und die Sporenmenge. Neu erbaute Lagerräume können mittlerweile mit Filtersystemen ausgestattet werden, die das Eindringen von Pilzsporen, pflanzlichen Pollen und Schmutzpartikeln verhindern. Allgemein wird die Filterklasse F5-F7 als Endfilter in Klimaanlagen für Büros, Verkaufsräume, bestimmten Produktionsstätten und Museen verwendet. Häufiges Reinigen der Objekte und Lagerregale mit HEPA-Saugern wird empfohlen, um die Menge an abgelagerten Pilzsporen möglichst klein zu halten.

Zu (3) Durch regelmäßige Überwachung der Objekte und der Raumluft können Veränderungen, die auf einen Pilzbefall hinweisen, frühzeitig bemerkt und behandelt werden. Erst kürzlich haben bedeutende europäische Museen damit begonnen mikrobielle Überwachungsprogramme einzurichten: diese umfassen die Messung von Pilzsporen in der Raumluft, die quantitative und qualitative Untersuchung von Pilzsporen auf Oberflächen von Objekten und in Museumsregalen und die Entwicklung von museumsspezifischen Hygieneplänen sowie der im Falle eines Wasserschadens zu ergreifenden Notfallmaßnahmen. Aufgrund mikrobiologischer Untersuchungen kann der hygienische Zustand des Museums ermittelt und ein Konzept für dessen Optimierung sowie eine spezifische Katastropheneinsatzplanung erstellt werden (Dicus 2000, Barton & Wellheiser 1985). Die Einrichtung von Quarantäneräumen für befallene Objekte stellt eine wesentliche Voraussetzung zur Verhinderung von Kontaminationen in Schauräumen oder Depots dar.

Reinigung von kontaminierten Objekten

Im Zuge von Reinigungs- und Konservierungsmaßnahmen erfolgt zunächst eine sorgfältige Untersuchung der Objekte durch Restauratoren und Restauratorinnen. Besteht der Verdacht auf einen Befall mit Schimmelpilzen oder Bakterien, sollten Mikrobiologen zugezogen werden, die in weiteren Untersuchungen die entsprechenden Reinigungsmaßnahmen gemeinsam mit dem Restaurator /der Restauratorin fest legen. Vorzugsweise sollte auf Seite der Mikrobiologen Grundkenntnisse über Materialien und Restaurierungstechniken vorhanden sein, damit ein optimal auf das Objekt abgestimmter Behandlungsplan entwickelt werden kann.

Für einen auf der Oberfläche vorhandenen Pilzbefall gilt, dass dieser zunächst mechanisch entfernt werden sollte. Die geeignete Reinigungsmethode – Saugen, Bürsten, Abnahme mit Wattestäbchen oder Skalpell - wird von der chemischen Zusammensetzung und der Stärke des Materials selbst sowie und von der chemischen Qualität der nicht-biogenen Patina und der Verschmutzungen bestimmt. Bei der Abnahme von Schimmelpilzkolonien muss beachtet werden: (1) Die mechanische Behandlung darf nicht dazu führen, dass die Pilzsporen tiefer in das Material getrieben werden – dies kann insbesondere bei porösen Untergründen passieren – und (2) die ausführenden Restauratoren müssen sich durch Feinstaubmasken (FFP 3) vor dem Einatmen aufgewirbelter Pilzsporen schützen.

Die Überprüfung der Lebensfähigkeit der Schimmelpilze und ihrer Sporen ist wesentlich für die Auswahl der über die mechanische Reinigung hinausgehenden Desinfektionsmaßnahmen. Die Entnahme von Proben - Pilzsporen oder kleine Myzelfragmente – kann Aufschluss über die Keimungsfähigkeit der Sporen und die Wachstumsfähigkeit der Myzelien liefern. Die Probenentnahme kann meist vor Ort im Museum erfolgen und wird mit

einer Nadel (Glasnadel oder chirurgische Nadel), mit Wattestäbchen oder dem sterilen Skalpell durchgeführt. Diese Methoden sind für das Objekt zerstörungsfrei oder zumindest minimal invasiv. In manchen Fällen ist es wichtig fest zu stellen, ob die Pilze in die Tiefe des Materials – z.B. unter die Malschicht, in den Putz – eingedrungen ist. In diesem Fall sollten die Restauratoren gemeinsam mit den Mikrobiologen über eine geeignete Stelle am Objekt entscheiden, wo eine tiefer gehende Beprobung zulässig ist. Zur Anreicherung der Pilze im Labor sind Malzextraktagar und Dichloran-Glycerol-Agar in Routinetests gebräuchlich. Insbesondere die xerophilen Pilze sind nur auf osmotischen Medien wachstumsfähig: zum Nachweis sollten daher Czapek Medien mit 20% oder 40% Sucrose verwendet werden. Um die Fähigkeit der Pilze bestimmte Materialien abzubauen testen zu können, werden Zelluloseagar, Kaseinagar oder andere spezielle Indikatormedien verwendet (Pangallo et al. 2009). Sollte sich die auf einem Objekt vorhandene Pilzflora als nicht mehr keimungs- und wachstumsfähig herausstellen, dann ist der Einsatz eines Biozides nicht notwendig und nicht sinnvoll.

Für eine Desinfektion von rezenten und fortschreitendem Pilzschäden gibt es eine Reihe von physikalischen und chemischen Methoden (Allsopp et al. 2004), von denen nur diejenigen hier aufgezählt werden, die zum einen in der Routinearbeit verwendet werden und deren Verträglichkeit gegenüber zahlreichen unterschiedlichen Materialien nachgewiesen ist. Eine wirksame physikalische Methode um Pilze und ihre Sporen zu töten ist der Gebrauch von Gammastrahlung. Die meisten Forscher empfehlen eine höhere Dosis als für Bakterien: Um Pilze und deren Sporen abzutöten, ist eine Dosis von 10-20KGy notwendig (Nittérus 2000a). In solchen Dosen angewendet, zerstört Gammastrahlung jedoch unter Umständen auch die chemische Zusammensetzung von Materialien – z.B. kommt es zum wesentlichen Verlust der Festigkeit von Papier durch die Zerstörung der Zellulosefasern. Daher muss der Einsatz von Gammastrahlung gründlich überdacht und auf besonders stabile Materialien beschränkt bleiben.

Die Auswahl eines geeigneten Biozides zur chemischen Behandlung und Abtötung von Schimmelpilzen ist durch die Europäische Biozid-direktive reglementiert. Für die Anwendung im Bereich Restaurierung und Konservierung gelten drei Substanzklassen als materialverträglich und zugleich wirksam gegen Pilze: (1) Formaldehyddepotverbindungen, die meist eine gute Wirksamkeit aufweisen aber sowohl für den Menschen wie auch für die Umwelt schädlich sind. Da Formaldehyd mit Proteinen wechselwirkt, kann es nur dann verwendet werden, wenn das zu behandelnde Objekt keine Proteine (z.B. Casein als Bindemittel) enthält, da es sonst zu Verfärbungen und Strukturveränderungen kommt. (2) Produkte die quaternäre Ammoniumverbindungen enthalten, mit einer optimalen Kettenlänge von C14-C16 (z.B. Metatin 5810-101, Neo Desogen, Dimanin, Antimoos). Diese so genannten „Quats“ sind schnell wirksame anti-mikrobielle Mittel, die als relativ umweltfreundlich gelten. Ihre Wirksamkeit wird bei einem hohen Anteil von Salzen und Proteinen verringert. (3) Isothiazolinon, ein relativ neues Biozid, von dem gezeigt wurde dass es sehr wirksam und sogar vorbeugend bei Objekten aus Papier ist. Behandlungen mit verschiedenen Phenolen (z.B. Thymol, Zymol) ergaben in mehreren Studien gute Ergebnisse, sollten aber nicht als allgemein fungitoxisch angesehen werden. Ethanol (70%) ist das häufigste Desinfektionsmittel in der Mikrobiologie, es kann dann effektiv eingesetzt werden, wenn die Einwirkzeit zumindest 2-3 Minuten beträgt und wenn die Pilze keine dickwandigen Sporen gebildet haben. Bloßes Aufsprühen von Ethanol, das dann gleich wieder verdampft, ist zur Abtötung von Pilzen nicht ausreichend (Nittérus 2000b).

Methoden zur Untersuchung von Pilzen auf Kunst- und Kulturgut

Heutzutage gibt es viele hoch technisierte Methoden um die Interaktion von Mikroorganismen mit dem Material zu untersuchen. Dennoch ist für die Konservierung und Konsolidierung von Museumsobjekten sowie der Vermeidung von biogenen Schäden eines besonders wichtig: Am Anfang jeder Untersuchung steht die genaue Beobachtung des Objektes und der darauf befindlichen Schimmelpilze, zunächst mit dem unbewaffneten Auge, dann mit dem Mikroskop.

Die Routineanalytik von Schimmelpilzen im Innenraum, auf Kunstgegenständen und Denkmälern basiert noch immer hauptsächlich auf klassischen Kultivierungsmethoden, unter Verwendung von standardisierten Medien wie MEA, DG18 und Dichlorbengalrosa-Medium (DRBC). Im Gegensatz zu Bakterien, bei denen allgemein angenommen wird, dass die Kultivierung weniger als 1% der Gesamtheit aus einer Umweltprobe wieder findet, wird die Wiederfindungsrate von Pilzen auf mehr als 70% geschätzt. Daher hat die Verwendung von Methoden, die auf Kultivierung basieren, trotz der rasanten Entwicklung von molekularbiologischen Methoden noch immer ihre Berechtigung. Reinkulturen von den isolierten Pilzen können von erfahrenen Mykologen morphologisch gut bestimmt werden. Derzeit in erster Linie in Zweifelsfällen oder bei sterilen Pilzkulturen durchgeführt, wetzt sich die molekularbiologische Identifizierung von Schimmelpilzen auf Basis von DNA Sequenzen mehr und mehr durch. Die Internal Transcribed Spacer Regionen (ITS1 und ITS2) gelten im Allgemeinen als geeigneter Sequenzbereich für Identifizierung von Schimmelpilzen (Sterflinger & Prillinger 2001, Martin & Rygiewicz 2005). Die ITS-Regionen haben – mit Ausnahme einiger Gattungen wie *Penicillium* oder *Apergillus* – eine ausreichende Variabilität zwischen den Arten, und zum Teil sogar auf Ebene der Subspezies Ebene. Zur Differenzierung

von Nahe verwandten Arten werden dann weitere Gene herangezogen: das ß-Tubulin Gen, das Gen für den Transkriptions Elongations Faktor 1, das Calmodulin und das Actin Gen (Samson et al. 2011a, b).

Molekularbiologische Methoden, die darauf beruhen die Pilz-DNA in Objekten zu untersuchen, werden insbesondere eingesetzt, um bereits abgestorbene Pilze nachzuweisen und damit Rückschlüsse auf die Lagerungshistorie, die Herkunft der Objekte oder spezifische Zerstörungsmuster ziehen zu können. DNA ist ein äußerst stabiles Molekül, das auch nach Jahrzehnten noch in Objekten nachweisbar sein kann. Auch im Falle, dass Objekte aufgrund ihres hohen Wertes nur minimale Probenmengen erlauben, kann aus diesen noch effektiv DNA extrahiert und die Pilzmikroflora damit untersucht werden.

Die derzeit gängigste Methode zur Charakterisierung der Pilzmikroflora in Materialien ist die so genannte Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) (Portillo et al. 2008). Dabei wird die DNA aus einer Probe extrahiert und die Gesamtheit der Pilz-DNA mit Hilfe der Polymerase-Kettenreaktion vervielfältigt. Die DNA der unterschiedlichen Pilze durch einen chemischen Gradienten im Gel aufgetrennt und die unterschiedlichen Banden können dann genauer charakterisiert und bestimmten Pilzarten zugeordnet werden. DGGE Studien von Schimmelpilzpopulationen basieren vorwiegend auf Amplifizierung der ITS Bereiche (Michaelsen et al. 2006).

Ein wesentlich tieferer Einblick in die Lebensweise und metabolische Aktivität von Pilzen auf und in Materialien und die damit verbundenen Zerstörungen, wird durch die Analyse von RNA erzielt. Die Menge der in den Zellen vorhandenen RNA ist ein Maß für deren Aktivität und die Menge spezifischer RNA Moleküle erlaubt Aufschluss über bestimmte, in der Zelle aktive, Funktionen. Mit Hilfe der reversen Transcriptase qPCR, können RNA Moleküle, die für spezifische Enzyme und damit Funktionen kodieren quantitativ erfasst werden. RNA-basierte Untersuchungen wurden bereits in der Höhle von Altamira in Spanien erfolgreich durchgeführt (Portillo et al. 2008). Auch die Analyse des Proteoms von Pilzen (Proteomik / Metaproteomik) kann neue Erkenntnisse über die Aktivität von Pilzen auf Kunstobjekten bringen (Isola et al. 2011).

Schlussfolgerungen

Pilze haben eine enorme Bedeutung für die Veränderung, Zerstörung und Verwitterung von Kunst- und Kulturgut. Durch die intensive Zusammenarbeit zwischen Mikrobiologen und Restauratoren, durch Schulung und Training der Museumsmitarbeiter, der Leitungsgremien und der Kuratoren können wesentliche Verbesserungen erzielt werden. Die „Austrian Center of Biological Resources and Applied Mycology“ (www.boku.ac.at/acbr.html), eine Einrichtung der Universität für Bodenkultur in Wien, bietet ein Spezialservice zur Beratung von Museen, RestauratorInnen und Archäologen an.

Danksagung

Mein Dank richtet sich an das Kunsthistorische Museum Wien, das Theatermuseum, die Sammlung Essl, das Albertina Museum, das Niederösterreichische Landesmuseum in St. Pölten, das Völkerkundemuseum, an die Akademie der bildenden Künste Wien, der Universität für Angewandte Kunst Wien, an das Wien Museum und das Bundesdenkmalamt Österreich, das Bundesamt für Kultur Schweiz und an das Institute for Mummies and the Iceman (Italien) für die hervorragende Unterstützung und unsere gute Zusammenarbeit.

LITERATUR

Allsopp D., Seral K. & Gaylarde C. (2004): Introduction to Biodeterioration. — Cambridge Univ. Press, 237 pp.

Barton J.P. & Wellheiser J.G. (Eds.) (1985): An Ounce of Prevention:a Handbook on Disaster Contingency Planning for Archives,Libraries and Record Centres. — Toronto Area Archivists Group Education Foundation.

Bastian F. & Alabouvette C. (2009): Lights and shadows on the conservation of a rock art cave: the case of Lascaux cave. — International Journal of Speleology **38**: 55–60.

Bech-Andersen J. & Elborne S.A. (2004): The true dry rot fungus *(Serpula lacrymans)* from nature to houses. — In: Dradacky M. (Ed.), European Research on Cultural Heritage State of the Art Studies, vol. **2**: 445–448.

Blyskal B. (2009): Fungi utilizing keratinous substrates. — International Biodeterioration and Biodegradation **63**: 631–653.

Camuffo D. (1998): Microclimate for Cultural Heritage. — Elsevier, Amsterdam, 415 pp.

Capitelli F., Fermo P., Vechi R., Piazzalunga A., Valli G.,Zanardini E. & Sorlini C. (2009): Chemical–physical and microbiological calmeasurements for indoor air qualita` assessment atthe Ca'Granda Historical Archive, Milan (Italy). — Water, Air, and Soil Pollution **201**: 109–120.

Cooke M. (2002): European review of biocides. — Pharma Chem. **1**: 48–50.

De los Rios A. & Ascaso C. (2005): Contributions of in situ microscopyto the current understanding of stone biodeterioration. — International Microbiology **8**: 181–188.

Diakumaku E., Gorbushina A.A., Krumbein W.E., Panina L. & Soukharjevski S. (1995): Black fungi on marble and limestone – an aesthetical, chemical and physical problem for the conservation of monuments. — Science of the Total Environment **167**: 295–304.

Dicus D.H. (2000): One response to a collection wide mold outbreak: how bad can it be, how good can it get? — Journal of the American Institute for Conservation **39**: 85–105.

Gadd G.M. (2007): Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. — Mycological Research **111**: 3–49.

Gysels K., Delalieeux F., Deutsch F., Van Gieken R., Camuffo D., Bernardi A., Sturaro G., Busse H.J. & Wieser M. (2004): Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts. — Journal of Cultural Heritage **5**: 221–230.

Huckfeld T. & Schmidt O. (2006): Hausfäule- und Bauholzpilze – Diagnose und Sanierung. — Rudolf Müller Verlag, Köln, 377 pp.

Isola D., Marzban G., Selbmann L., Onofri S., Laimer M. & Sterflinger K. (2010): Sample preparation and 2-DE procedure for protein expression profiling of black microcolonial fungi. — Fungal Biol. **115** (10): 971-977 (2011) PMID 21944209

Koestler R.J., Koestler V.H., Charola A.E. & Nieto Fernandez F.E. (Eds.) (2003): Art, Biology and Conservation: Biodeterioration of Works of Art. — The Metropolitan Museum of Art, New York.

Manoharachary C., Reddy P.J.M., Prabhakar B. & Mohan K.C. (1997): Fungal spora and biodeterioration in some museums and libraries of Hyderabad, India. — Journal of Environmental Biology **18**: 37–42.

Martin K.J. & Rygiewicz P.T. (2005): Fungal-specific PCR primers developed for analysis of the ITS region of environmental DNA extracts. — BMC Microbiology **5**: 28.

Marvasi M., Donnarumma F., Frandi A., Mastomei G., Sterflinger K., Tiano P. & Perito B. (2012): Black microcolonial fungi as deteriogens of two famous marble statues in Florence, Italy. — International Biodeterioration and Biodegradation: im Druck.

Meier C. & Petersen K. (2006): Schimmelpilze auf Papier – Ein Handbuch für Restauratoren. — Der Andere Verlag,198 pp.

Mesquita N., Portugal A., Videira S., Rodríguez-Echeverría S., Bandeira A.M.L., Santos M.J.A. & Freitas H. (2009): Fungal diversity in ancient documents. A case study on the Archive of the University of Coimbra. — International Biodeterioration and Biodegradation **63**: 626–629.

Michaelsen A., Pinarzi F., Ripka K., Lubitz W. & Pinar G. (2006): Application of molecular techniques for identification of fungal communities colonizing paper material. — International Biodeterioration and Biodegradation **58**: 133–141.

Nittérus M. (2000a): Fungi in archives and libraries, a literary survey. — Restaurator **21**: 25–40.

Nittérus M. (2000b): Ethanol as fungal sanitizer in paper conservation. — Restaurator **21**: 101–115.

Pangallo D., Simonovicova A., Chovanova K. & Ferianc P. (2007): Wooden art objects and the museum environment: identification and biodeteriorative characteristics of isolated microflora. — Letters in Applied Microbiology **45**: 78–94.

Pangallo D., Chovanova K., Simonovicova A. & Ferianc P. (2009): Investigation of microbial community isolated from indoor artworks and their environment: identification, biodegradative abilities, and DNA typing. — Canadian Journal of Microbiology **55**: 277–287.

Portillo M.C., Gonzalez J.M. & Saiz-Jimenez C. (2008): Metabolically active microbial communities of yellow and grey colonizations on the walls of Altamira Cave, Spain. — Journal of Applied Microbiology **104**: 681–691.

Saarela M., Alakomi H.L., Suihko M.L., Maunuksela L., Raaska L. & Mattila-Sandholm T. (2004): Heterotrophic microorganisms in air and biofilm samples from Roman catacombs, with special emphasis on actinobacteria and fungi. — International Biodeterioration and Biodegradation **54**: 27–37.

Samson R.A. & Houbraken J. (Eds.) (2011a): Phylogenetic and taxonomic studies on the genera *Penicillium* and *Talaromyces*. — Studies in Mycology **70**: 183 pp.

Samson R.A., Varga J. & Frisvad J. (2011b): Taxonomic studies on the genus *Aspergillus.* — Studies in Mycology **69**: 96 pp.

Scheerer S., Ortega-Morales O. & Galarde C. (2009): Microbial deterioration of stone monuments – an updated overview. — Advances in Microbiology **66**: 97–139.

Sedlbauer K. & Krus M. (2003): Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht. — Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, 45 pp.

Selbmann L., de Hoog G.S., Mazzaglia A., Friedmann E.I. & Onofri S. (2005): Fungi at the edge of life: cryptoendolithic black fungi from the Antarctic desert. — In: de Hogg G.S. (Ed.) Fungi of the Antarctic: Evolution Under Extreme Conditions. Studies in Mycology **51**: 1–32.

Sterflinger K., Krumbein W.E. & Rullkötter J. (1999): Patination of marble sandstone and granite by microbial communities. — Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft **150**: 299–311.

Sterflinger K. (2000): Fungi as geologic agents. — Geomicrobiology Journal **17**: 97–124.

Sterflinger K. & Prillinger H. (2001): Molecular taxonomy and biodiversity of rock fungal communities in an urban environment (Vienna, Austria). — Antonie van Leeuwenhoek **80**: 275–286.

Sterflinger K. (2005): Black yeasts and meristematic fungi: ecology, diversity and identification. — In: Rosa C. & Gabor P. (Eds.), Yeast Handbook. Biodiversity and Ecophysiology of Yeasts, vol. **1**. Springer, New York, pp. 501–514.

Sterflinger K. (2010): Fungi: Their role in the deterioration of cultural heritage. — Fungal Biology Reviews **24**: 47-55; ISSN 1749-4613.

Sterflinger K. & Pinzari F. (2012): The revenge of time: fungal deterioration of cultural heritage with particular reference to books, paper and parchment. — Environmental Microbiology: in press.

Urzì C., La Cono V., De Leo F. & Donato P. (2003): Fluorescent in situ hybridization (FISH) to study biodeterioration. — In: Saiz-Jimenez C. (Ed.), Molecular Biology and Cultural Heritage. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, pp. 55–60.